

MODEL DYNAMICKÉHO TEPELNÉHO CHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH DETAILŮ

Ondřej Šíkula

Ústav technických zařízení budov, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně
e-mail: sikula.o@fce.vutbr.cz

ABSTRAKT

Podstatou příspěvku je prezentace nového výpočetního modelu určeného pro dynamickou simulaci přenosu tepla v konstrukčních detailech stavebních konstrukcí.

Vlastní výpočetní model je založen na numerickém řešení dvourozměrného nestacionárního vedení tepla metodou kontrolních objemů s využitím obecných okrajových podmínek. Příspěvek obsahuje popis modelu, úlohy ověřující jeho správnost, a také úlohy prezentující využití modelu aplikovaného na konkrétní stavebně-konstrukční detail. Z úloh k využití modelu je prezentován výpočet lineárního činitele tepelných mostů a analýza vlivu volby počáteční podmínek na časovou náročnost simulace nestacionárního sdílení tepla.

Klíčová slova: stavebně-konstrukční detail, dynamický model přenosu tepla, lineární činitel tepelných mostů

MODEL OF DYNAMIC THERMAL BEHAVIOUR OF STRUCTURAL DETAILS

The subject matter of the contribution is a presentation of a new calculation model designed for a dynamic simulation of heat transfer in building structure details. The actual calculation model is based on a numerical solution to 2D transient heat transfer by a method of finite volumes using general boundary conditions. The contribution includes a description of the model, tasks verifying its accuracy, and also tasks presenting the use of the model applied to a particular building structure detail. There is presented a linear thermal transmittance calculation and an analysis of a choice of initial conditions influence on a temporal demand of transient heat transfer simulation.

Keywords: building structures detail, dynamical model of heat transfer, linear thermal transmittance

ÚVOD

Posuzování detailů stavebních konstrukcí vyžaduje stále dokonalejší matematicko-fyzikální metody, a to nejen pro děje stacionární, ale i nestacionární. Modelování sdílení tepla ve stavebně-konstrukčních detailech má význam energetický, hygienický, technologický a další. Modelování a simulace je tak využitelné například pro zjištění tepelných ztrát (např. ve formě činitele tepelných mostů ψ), pro zhodnocení možností vzniku kondenzace vzdušné vlhkosti na površích nebo uvnitř konstrukce, posouzení minimální a maximální povrchové teploty z hlediska kontaktu s osobami (například u podlahového vytápění, nebo stropního chlazení). Další oblastí využití je posuzování látek se skupenskou změnou PCM (Phase Change Materials), u kterých se využívá skupenského tepla tání ke zvýšení tepelně-akumulačních schopností konstrukce.

Současné normativní, tepelně-technické požadavky, a tím také většina způsobů hodnocení stavebních konstrukcí, vycházejí obvykle ze stacionárních, případně kvazistacionárních okrajových podmínek. Tyto metody tak plně nerespektují dynamiku vnitřního a vnějšího prostředí a také soustav TZB (technických zařízení budov), které k tvorbě vnitřního klima budov neodmyslitelně patří. Také stávající výpočetní softwary nejsou buď dostatečně robustní, nebo uživatelsky či finančně přijatelné pro širokou odbornou ve-

řejnost. Z tohoto důvodu jsem vytvořil v prostředí MS Excel nový matematický model ve formě výpočetního nástroje pro řešení 2D vedení tepla s dynamickými okrajovými podmínkami, který v budoucnu vyústí v samostatný software.

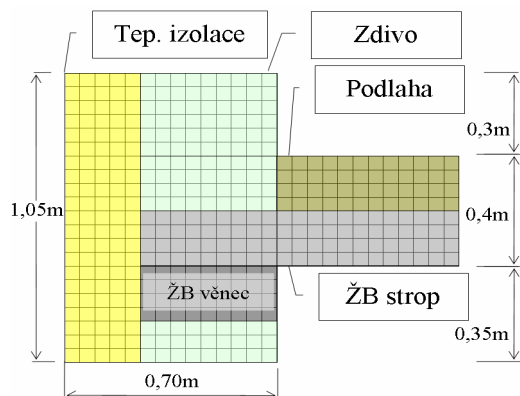
POUŽITÉ METODY

Vlastní matematický výpočetní model je založen na numerické metodě kontrolních objemů, která ze své podstaty nejlépe splňuje podmínku zachování energie, blíže [1]. Řešení diferenciální rovnice vedení tepla je provedeno na síti obdélníkových elementů, kde jsou teploty a materiálové charakteristiky vztaženy k těžišti každého z nich. Tepelné toky mezi kontrolními prvky sítě jsou stanoveny za předpokladu lineárního průběhu teplot mezi nimi. Výsledná soustava rovnic je z důvodů větší rychlosti a menší náročnosti řešena iterativními metodami. V modelu je možno zadávat obecné okrajové podmínky (teplotu, tepelný tok, teplotu okolní tekutiny a součinitel přestupu tepla a některé kombinace předchozích). Uvnitř řešeného pole je možno modelovat vnitřní zdroj tepla. Materiálové charakteristiky lze zadávat i jiné než konstantní a mohou tak být funkcí například teploty.

Tento výpočetní model je koncipován obecně tak, aby bylo možné v budoucnu jeho rozšíření o další fyzikální jevy uplatnitelné v oboru TZB.

VYUŽITÍ MODELU

Současné využití modelu bude ukázáno na konkrétním stavebně-konstrukčním detailu – viz obr. 1. Cílem je ověřit správnost nového modelu a na zjednodušeném případě prezentovat jeho využití.



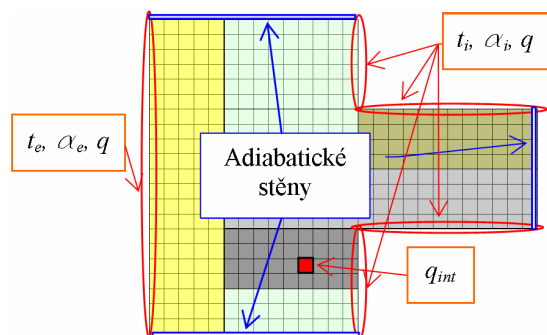
Obr. 1 – Geometrie a materiály použité v modelu

Jedná se o detail uložení stropní železobetonové monolitické konstrukce na železobetonový věnec vnější obvodové stěny. V tab. 1 jsou uvedeny tepelně-technické vlastnosti použitých materiálů.

Tab. 1 – Tepelně-technické vlastnosti materiálů

	λ [W/(m.K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg.K)]
tep. izolace	0.04	30	1270
zdivo	0.085	350	1000
žb strop	1.2	2200	1020
žb vñec	1.5	2400	1200
podlaha	0.085	350	1000

Výpočetní síť v modulu 5 cm a možnosti zadávání vnitřních a okrajových podmínek jsou na obr. 2. Vždy jsou uvažovány součinitele přestupu tepla $\alpha_i = 5$ [W.m⁻².K⁻¹], $\alpha_e = 15$ [W.m⁻².K⁻¹].



Obr. 2 – Výpočetová síť a okrajové podmínky

Pro verifikaci modelu byly zvoleny testovací úlohy (simulace), které měly ověřit jeho správnost pro řešení stacionárního a nestacionárního sdílení tepla. Verifikace modelu byla provedena srovnáním jeho výstupů se softwarem Fluent 6.3 a analýzou výsledků z hlediska zákona zachování energie. Řešené testovací a demonstrační úlohy se všechny vztahují k výše

uvedenému konstrukčnímu detailu a jsou i se stručným popisem seřazeny v tab. 2.

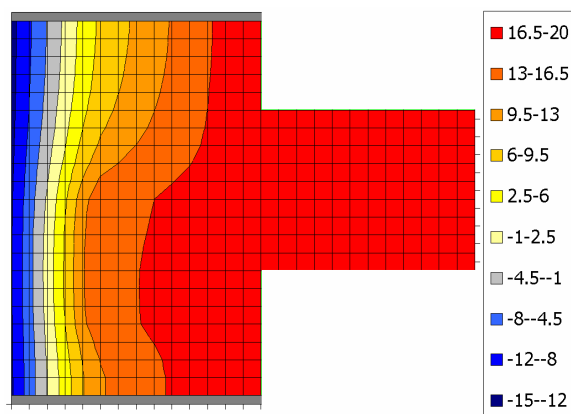
Tab. 2 – Přehled a popis řešených simulací

Ozn.	Stacionární / nestacionární	Cíl simulace/úlohy
A	stacionární	porovnání s Fluentem, ukázka využití modelu pro výpočet ψ
B	nestacionární	verifikace kontrolou celkové tepelné bilance
C	nestacionární	vliv volby počáteční podmínky na rychlost ustálení teplot. pole $t_{poč.} = t_{okrajová, Ext., průměr}$
D	nestacionární	vliv volby počáteční podmínky na rychlost ustálení teplot. pole $t_{poč.} = t_{okrajová, Ext., průměr}$

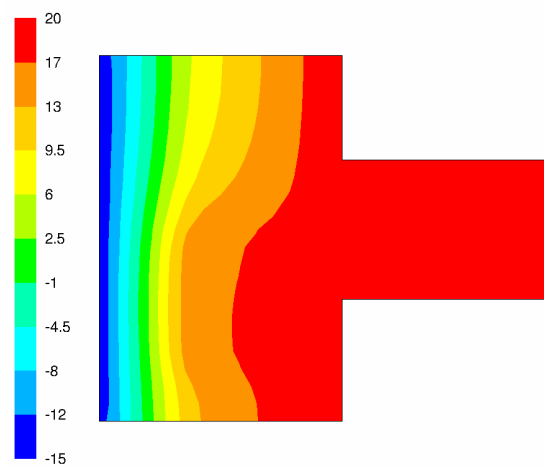
VÝSLEDKY A DISKUSE

Úloha A

Teplotní pole spočtené pro ustálené okrajové podmínky vlastním výpočetním programem je zobrazeno na obr. 3, programem Fluent 6.3 na obr. 4. Okrajové podmínky byly uvažovány $t_i = 20$ [°C], $t_e = -15$ [°C]. Celkový vypočtený tepelný tok detailem je 4,4 W a shoda obou metod je 100%.



Obr. 3 – Výsledné teplotní pole, úloha A, vlastní model

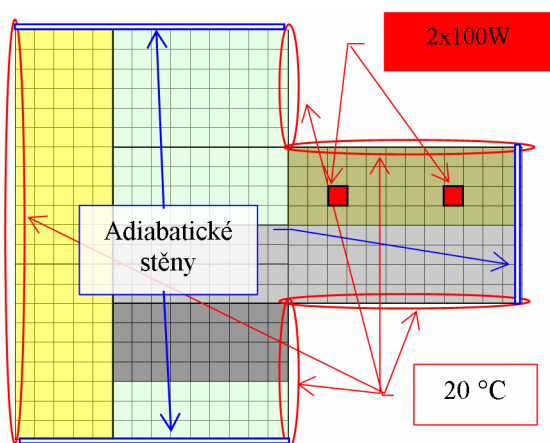


Obr. 4 – Výsledné teplotní pole, úloha A, Fluent 6.3

Simulaci A lze následujícím způsobem využít pro výpočet lineárního činitele tepelných mostů ψ . Tepelná propustnost detailu L byla vypočtena za předpokladu stejných teplot v interiéru nad a pod stropem a je rovna $0,12 \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$. Součinitel prostupu tepla stěny přezásobený délkou detailu $U.b$ je $0,08 \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$. Lineární činitel tepelných mostů ψ , vypočtený dle [2], je pak roven $0,035 \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$.

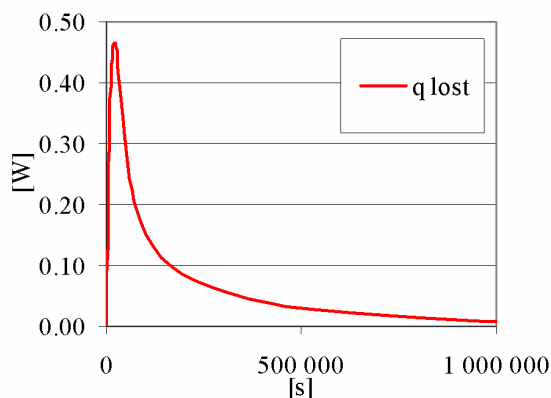
Úloha B

Pro verifikaci nestacionárního řešení byl využit následující případ. Počáteční a okrajové podmínky byly dány jednotně teplotou 20°C . Nejprve od času 0 po dobu 300 s působily v konstrukci podlahy dva vnitřní zdroje tepla každý o výkonu 100 W, v místech dle obr. 5. Po 300 s byly zdroje tepla vypnuty a bylo sledováno, kolik odtéká přes neadiabatické okraje detailu do okolí. Součet tepelných toků tepla přes všechny povrchy byl označen q_{lost} a jeho průběh v čase zobrazen na obr. 6.



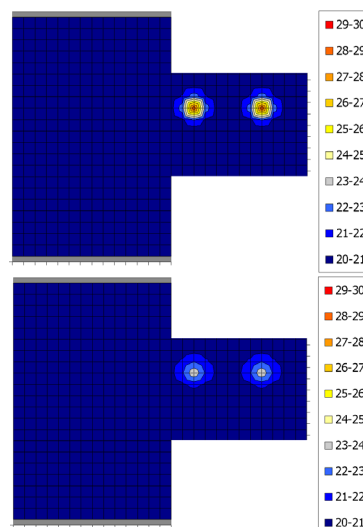
Obr. 5 – Okrajové a vnitřní podmínky, úloha B

Integrací této křivky od nuly do téměř 7,5 milionů sekund bylo spočteno rozhodující množství tepla o celkové hodnotě 59 978 J. Celkové množství tepla vnesené vnitřními zdroji do konstrukce je rovno 60 000 J. Rozdíl mezi těmito hodnotami je tedy menší než 0,04 % a je způsoben z větší části nemožností integrovat průběh křivky q_{lost} až k nekonečnu.



Obr. 6 – Průběh tepelných ztrát detailu v čase

Na obr. 7 jsou pro představu vyobrazena teplotní pole v časovém okamžiku 7 400 s a 23 300 s od počátku. Vnitřní zdroje tepla jsou již dávno vypnuty. Dochází tedy pouze k odtoku naakumulovaného tepla z míst kdy byly zdroje tepla do dalších oblastí.

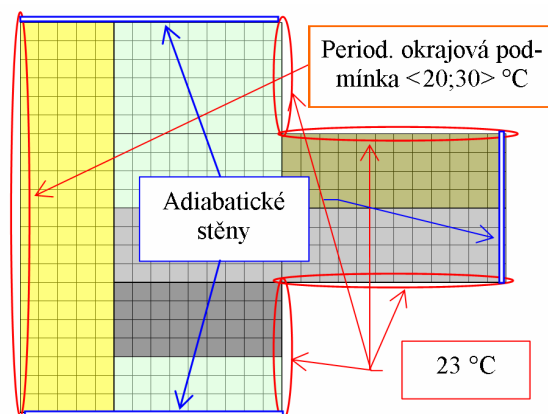


Obr. 7 – Teplotní pole v čase 7 400 a 23 300 s

Touto úlohou bylo ověřeno respektování zákona zachování energie výpočtovým modelem.

TESTOVÁNÍ VLIVU POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

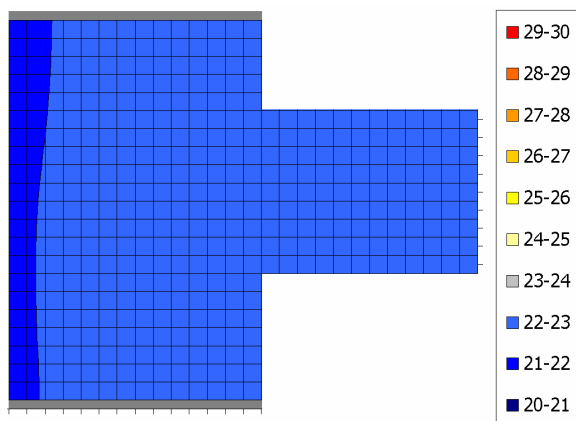
V úlohách C a D je prezentováno využití modelu pro stanovení vhodných počátečních podmínek nestacionárního řešení sdílení tepla. Obě byly řešeny pro periodické kolísání teplot v exteriéru od 20°C do 30°C a konstantní vnitřní teplotu 23°C . Obě simulace byly provedeny shodně od 0 hodin prvního dne po 0 hodin 20. dne v hrubém časovém kroku 1 h.



Obr. 8 – Okrajové podmínky pro úlohy C a D

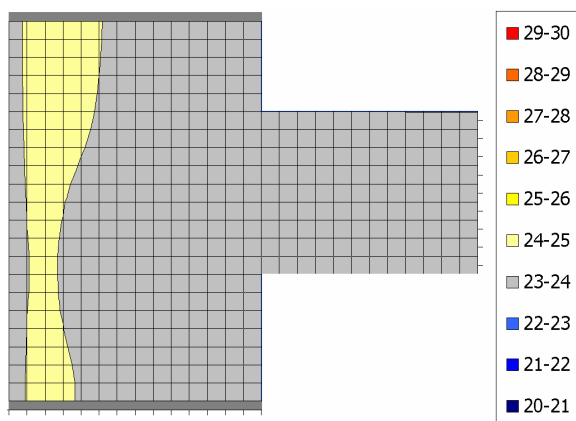
Úloha C

V této úloze bylo pro počáteční podmínku použito teplotní pole spočtené jako časově ustálené pro teplotu interiéru a teplotu exteriéru pro 0 h, tedy pro teplotu odpovídající venkovní okrajové podmínce v tuto dobu – viz obr. 9.



Obr. 9 – Počáteční podmínka, úloha C

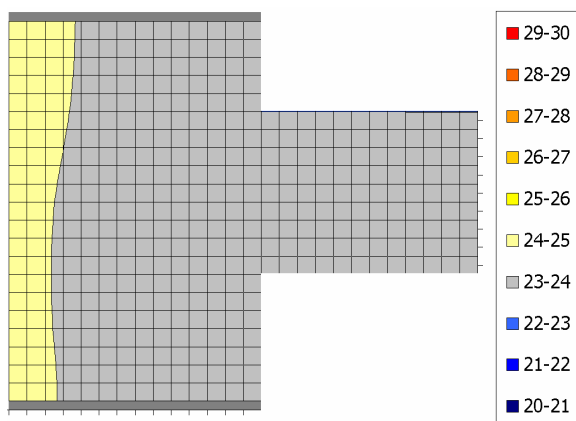
Teprve po provedení simulace po dobu 20-ti dnů bylo 20. dne pro 0. hodinu ranní dosaženo teplotního pole, které se vždy v 0-tou hodinu v každém z následujících dnů již prakticky nemění – viz obr. 10. Toto teplotní pole označuji dále jakou „ideální“ počáteční podmínku. Nyní budu hledat jednoduše definovatelnou počáteční podmínku, která se jí bude co nejvíce blížit.



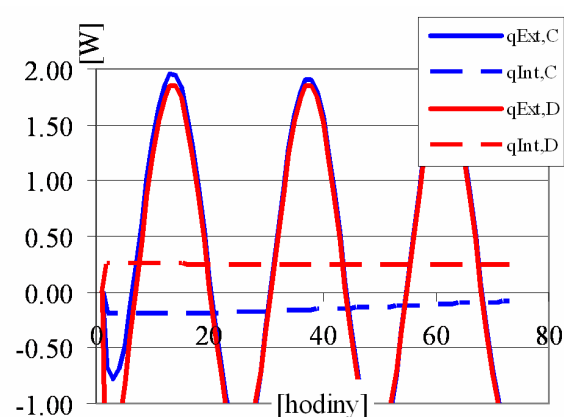
Obr. 10 – Teplotní pole 20. dne v 0 h, úloha C

Úloha D

V této úloze bylo pro počáteční podmínku zvoleno teplotní pole spočtené jako časově ustálené pro teplotu interiéru a teplotu exteriéru pro 9. h ranní, kdy je teplota exteriéru rovna 25 °C, což je průměrná teplota za celý den. Viz obr. 11.



Obr. 11 – Počáteční podmínka, úloha D



Obr. 12 – Průběh tepelných toků, úlohy C a D

Na obr. 12 je znázorněn dynamický průběh sdílení tepla mezi řešeným detailem a okolím pro úlohy C a D. V označení tepelných toků je rozlišeno, zda se jedná o tepelné toky do interiéru, nebo exteriéru. Díky značnému tepelnému odporu řešeného detailu je kolísání tepelných toků do interiéru v obou případech velmi malé a v grafu nepozorovatelné.

Tab. 3 – Porovnání počátečních entalpií průřezu

Varianta počáteční podmínky	Časový okamžik	Entalpie průřezu	Rozdíl entalpií
		[kJ]	[kJ]
„ideální“	20. den 0 h	33 077	0
C	1. den 0 h	32 746	329
D	1. den 0 h	33 076	2

Z tab. 3 vyplývá, že volba počáteční podmínky definované v úloze D je výrazně vhodnější, než té z úlohy C, protože entalpie celého průřezu vykazuje v tomto případě řádově nižší rozdíl od počáteční podmínky „ideální“. Z tab. 3 je také patrné, že ve variantě C je třeba přivést do průřezu téměř 330 kJ, což v daných podmínkách trvá přibližně 20 dní. Naproti tomu ve variantě D stačí pro získání „ideálního“ rozložení teplot přivést do průřezu jen 2 kJ, což trvá zhruba den – viz obr. 12. Pro tyto výpočty byla nulová entalpie zvolena pro teplotu 0 °C.

ZÁVĚR

V příspěvku byl prezentován nově vytvořený výpočetní model pro dynamické simulace dvourozměrných stavebně-konstrukčních detailů, jeho ověření a využití. Z výsledků testovacích úloh A, B plyne, že výpočetní model je funkční.

Na úlohách C a D pak byl testován vliv počáteční podmínky, přičemž se ukázalo, jak zásadně může volba počátečních okrajových podmínek nestacionární simulaci ovlivnit.

Model je využitelný pro dynamické simulaci systémů podlahového, stropního či stěnového vytápění a chlazení, dále pro zjištění tepelných ztrát (např. ve formě činitele tepelných mostů ψ), pro zhodnocení možností vzniku kondenzace vzdušné vlhkosti na

površích, nebo uvnitř konstrukce, posouzení minimální a maximální povrchové teploty z hygienického hlediska.

Prezentovaný model je současnosti převáděn do formy samostatného výpočetního softwaru v prostředí programovacího jazyka C#. V budoucnu plánuji jeho rozšíření o model tepelně-technického chování látek se skupenskou změnou (PCM), případně dalších fyzikálních jevů.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory programu TRVALÁ PROSPERITA národní program výzkumu II., MPO-ČR kód 2A – 1TP1/119 a za podpory GRAFO VUT v Brně.

LITERATURA

- [1] Šíkula O., Diskretizace v úlohách vedení tepla v TZB. In *Sborník abstraktů doktorské konference. Brno, VUT v Brně FAST*. 2005. p. 208-215. ISBN 80-214-2826-0.
- [2] Svoboda Z. *Lineární činitel prostupu tepla*. Dostupné na URL adrese <<http://people.fsv.cvut.cz/~svobodaz/skripta/linearni%20cinitel.pdf>>

PŘEHLED OZNAČENÍ

c	měrná tepelná kapacita [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
ρ	hustota [kg.m^{-3}]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
t_i	teplota interiéru [$^{\circ}\text{C}$]
t_e	teplota exteriéru [$^{\circ}\text{C}$]
α_i	součinitel přestupu tepla z interiéru [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
α_e	součinitel přestupu tepla z exteriéru [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
q	tepelný tok [W]
q_{lost}	tepelné ztráty detailu do okolí [W]
ψ	lineární činitel tepelných mostů [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]